DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.012　　文章编号：1000-128X(2023)05-0113-06

热界面材料层空洞对有无基板 IGBT 模块芯片结温影响对比研究

胡雅丽[1]，何　凯[2]，葛兴来[1]
（1.西南交通大学 电气工程学院，四川 成都　610031；
2.株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：新兴的无基板模块广泛应用于新能源领域，其对热界面材料的涂敷要求较高，但相关的研究目前较少。文章针对热界面材料（Thermal Interface Material，TIM）层空洞率不同时，对有、无基板IGBT模块上的芯片结温变化规律进行了仿真研究。通过建立精确数值模型进行稳态热仿真试验，根据试验结果定量分析有、无基板模块上的芯片结温受TIM空洞影响程度。结果表明，相比无基板模块，有基板模块上的芯片结温低，试验芯片分别低8.578 K和9.544 K左右；在TIM层空洞率上升时，对于结温升高速率，无基板模块比有基板模块大，无基板模块的大芯片和小芯片的升温速率分别约为对应的有基板模块大、小芯片的32.190倍和240.875倍；大芯片结温上升速率均比小芯片低，对于有、无基板的模块而言，前者分别约为后者的23倍和3倍。无基板模块对TIM层状态更敏感，要求更高。

关键词：无基板功率器件；有限元；稳态热仿真；热界面材料；空洞率；结温
中图分类号：TN305；TN325+.2　　**文献标识码：**A

Comparative study on effect of voids in thermal interface material layer on chip junction temperature of IGBT modules with and without baseplate

HU Yali[1], HE Kai[2], GE Xinglai[1]

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The emerging modules without baseplate are widely used in the field of new energy. They have high requirements for the coating of thermal interface material, but there are few related studies. In this paper, simulation research was conducted for the changing rule of the junction temperature of chips on IGBT modules with and without baseplate when the void ratio of the thermal interface material (TIM) is changing. A precise numerical model was established to carry out steady-state thermal simulation experiment. According to the results, quantitative analysis was conducted on the degree to which the chip junction temperature is affected by TIM voids on modules with and without baseplate. The results show that the chip junction temperature of the module with baseplate is lower than that of the module without baseplate, and the chip junction temperature is about 8.578 K and 9.544 K lower, respectively. When the void ratio of TIM layer increases, the junction temperature rise rate of the module without baseplate is greater than that of the module with baseplate, and the temperature rise rate of the large chip and the small chip of the module without baseplate is about 32.190 times and 240.875 times respectively that of the module with baseplate. The junction temperature rise rate of large chip is lower than that of small chip, which is about 23 times and 3 times, on modules with baseplate and without baseplate respectively. Modules without baseplate are more sensitive to the state of the TIM layer and have higher requirements.

基金项目：四川省区域创新合作项目（2021YFQ0051）
通信作者：何　凯（1988—），男，博士，高级工程师，主要从事电力电子热管理技术研究；E-mail: hekai1@csrzic.com
引用格式：胡雅丽, 何凯, 葛兴来. 热界面材料层空洞对有无基板IGBT模块芯片结温影响对比研究[J]. 机车电传动, 2023(5): 113-118.
Citation: HU Yali, HE Kai, GE Xinglai. Comparative study on effect of voids in thermal interface material layer on chip junction temperature of IGBT modules with and without baseplate[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 113-118.

Keywords: power device without baseplate; finite element; steady-state thermal simulation; thermal interface material; void ratio; junction temperature

0 引言

绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）模块结合了金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors，MOSFET）与大功率晶体管（Giant Transistor，GTR）的长处，形成了开关速度快、驱动功率小和通流能力强的优良特性[1]。优异的电转换效率、低开关损耗和高功率输出等优势，使大功率多芯片IGBT模块在新能源发电[2]、电力牵引[3]、智能电网[4]、航空航天[5]、军工装备[6]等领域都得到了极为广泛的应用。

影响IGBT使用寿命的主要因素之一是芯片结温[7]。随着工程中对降本的要求越来越高，无基板器件逐渐出现，并占据一定市场。无基板器件由于其结构特点，横向热扩散能力差，对热界面材料（Thermal Interface Material，TIM）涂敷要求高。导热硅脂作为一种TIM，对IGBT模块的散热有着重要作用。在工程应用中，在涂敷导热硅脂的过程中，以及器件运行一段时间后，导热硅脂都可能出现空洞等缺陷[8]，而当前对无基板器件硅脂缺陷对芯片结温影响的研究较少，因此研究模块TIM空洞对IGBT模块芯片结温的影响具有重要意义。目前，针对IGBT的传热研究主要集中在2个方向：一是从传热学角度采用数学分析法、积分近似解法、比拟法和数值计算法研究IGBT模块传热特性[9-12]；二是从结温监测方法入手，采用探测法、仿真法和结温迭代法研究IGBT结温特性[13-15]。

综上所述，深入研究IGBT模块芯片结温在TIM空洞影响下的变化规律具有重要意义。本文从该问题出发，通过有限元仿真的方法，对无基板器件导热硅脂缺陷下的温度特性进行定量研究，并引入有基板器件作为对比，定量指导无基板器件的应用。

1 IGBT传热学数学模型

在笛卡尔坐标系下，常物性、稳态、三维且有内热源问题的温度场控制方程为[16]

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}+\frac{\dot{\phi}}{\lambda}=0 \tag{1}$$

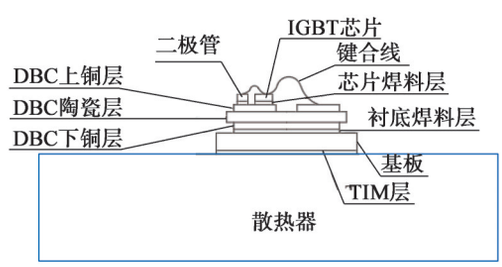
式中：t为温度；x,y,z为空间坐标；$\dot{\phi}$为内热源，代表单位时间内单位体积中产生的热能，W/m^3；λ为导热系数。

本文设定的边界条件为：①环境温度为20 ℃；②散热器底部与外界换热系数H=6 000 W/(K·m^2)。已知条件为：①x,y,z的边界以模块中相关实体结构位置边界为准；②λ为分段函数，与相关结构材料特性一致，以结构z轴边界为分段点；③本文设置芯片损耗为P=50 W，$\dot{\phi}=P/V_{\text{chip}}$，芯片体积以实体结构为准。在试验芯片上附加损耗50 W的体热元，热传导数学模型如式(1)，研究在不同TIM层空洞率条件下，试验芯片至散热器各层温度的变化规律。

2 模型构建

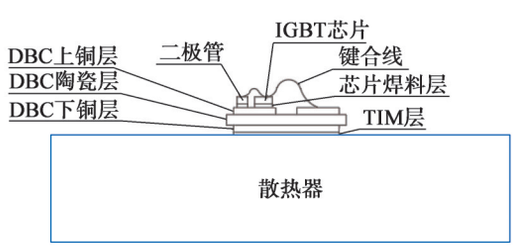
2.1 IGBT三维模型建立

IGBT器件除去塑料外壳封装和密封硅胶，有基板模块有7层结构，而无基板IGBT模块仅有5层结构，加上涂敷的TIM层（导热硅脂）和散热器，其结构如图1所示。对于有基板模块，从上到下依次为芯片（IGBT或二极管）、芯片焊料层、DBC上铜板、DBC陶瓷层、DBC下铜板、衬底焊料层、基板等结构，其中芯片（二极管）焊接在DBC上铜板上，通过铝线键合工艺实现电气连接。



有基板IGBT，7层结构+TIM+散热器

(a) 有基板IGBT模块



无基板IGBT，5层结构+TIM+散热器

(b) 无基板IGBT模块

图1 2种IGBT及其散热装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two kind of IGBT with heat sink

以无基板IGBT模块（EasyPACK系列中的F3L400R10W3S7F_B11）为基础，建立三维仿真模型，有基板模块则在其基础上增加焊料层和基板层。其中，各芯片编号如图2所示，芯片的边长及其热阻如表1[17]所示，各结构尺寸、材料和材料特性如表2所示。

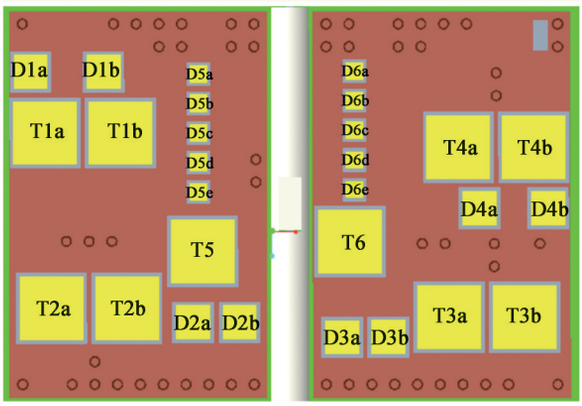


图2　模块IGBT芯片编号图

Fig. 2　Numbering diagram of the chips on the IGBT module

表1　芯片尺寸及其热阻参数

Table 1　Dimensions and thermal resistance parameters of chip

芯片编号	边长/mm	“结-散热器”热阻/(K·W^{-1})
T1*x*/T2*x* /T3*x* /T4*x* (*x* = a,b)	9.4	0.240
T5/T6	9.4	0.451
D1*x*/D2*x*/D3*x*/D4*x*(*x* = a,b)	5.5	0.570
D5*x*/D6*x*(*x*=a,b,c,d,e)	3.1	0.474

2.2　仿真试验设计

通过调整芯片发热面积实现与数据手册热阻参数的对标，将试验芯片的发热区域分别单独设为主要热源，并留有一定裕量，尺寸和材料特性如表1和表2所示，空洞设置如表3和图3所示，功耗配置如表4所示。采用有限元仿真软件计算稳态热传导问题，对模型仿真条件设定如下：

①调整参数后的空洞率仿真试验设定外部环境温度恒定为20 ℃，关闭辐射与对流散热，换热系数H=6 000 W/(K·m^2)；单个芯片损耗为50 W，在试验芯片上发热区赋损耗，发热芯片为体热元，而其他芯片及结构均不赋损耗，为无源结构；TIM层无空洞为标准组。

②本文的TIM层空洞率定义为

$$\rho_{\text{hole}}=\frac{S_{\text{hole}}}{S_{\text{P-chip}}}\times 100\% \tag{2}$$

式中：ρ_{hole}为芯片正下方TIM层的空洞率；S_{hole}为芯片正下方TIM层的空洞的面积；$S_{\text{P-chip}}$为TIM层空洞正上方芯片的发热区域面积。

③换热系数由仿真试验得出，为了降低计算复杂度，取H=6 000 W/(K·m^2)。

④完成网格无关性验证。

仿真试验设计如下：①第一组试验：在无基板模块上，取芯片二极管[D4a（面积大），D6a（面积小）]，分别进行空洞率0~100%的试验，对比面积不同芯片的结温随TIM层空洞率增大的变化速率。②第二组试验：在有基板模块上，取不同材料芯片二极管[D4a（面积大），D6a（面积小）]，分别进行空洞率0~100%的试验，对比面积不同芯片的结温随TIM层空洞率增大的变化速率。

综合分析第一组和第二组的试验结果，分别对比2种模块上不同面积芯片对TIM层空洞的敏感度。

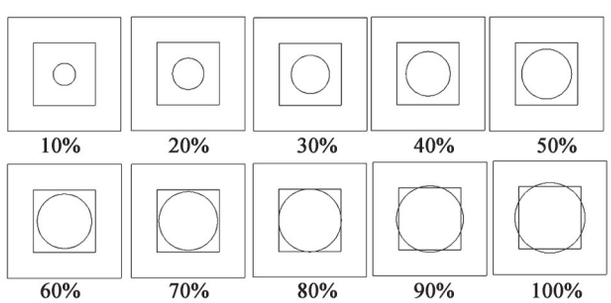


图3　D6a不同空洞率下的空洞示意图

Fig. 3　Void diagram at different void rates of chip D6a

表2　模块内各部分尺寸与材料及其材料特性

Table 2　Dimensions, materials and material characteristic of each part in the module

结构	材料	比热/(J·(kg·K)$^{-1}$)	热导率/(W/(m·K)$^{-1}$)	芯片面积/mm^2	厚度/mm
IGBT[T1*x*/T2*x* /T3*x*/T4*x*/T5*x*/T6*x*(*x* = a,b)]	Si	710.0	148	88.36	0.12
二极管[D1*x*/D2*x*/D3*x*/D4*x*(*x* = a,b)]	Si	710.0	148	30.25	0.12
二极管[D5*x*/D6*x*(*x* = a, b, c, d, e)]	SiC	677.8	330	9.61	0.12
芯片焊料层	Cu-Sn-Ag	300.0	34.0	与芯片一致	0.06
上铜层	Cu	385.0	395	2×1 734	0.28
陶瓷层	Al_2O_3	1 550.0	22.0	2×2 145	0.30
下铜层	Cu	385.0	395	2×2 052	0.24
无基板模块TIM层	TIM	1 000.0	4.40	4 290	0.10
模块散热器	Cu	385.0	395	7 777	5.00
有基板模块基板焊料层	Cu-Sn-Ag	300.0	34.0	4 617	0.10
有基板模块基板	Cu	385.0	395	4 617	3.00
有基板模块TIM层	TIM	1 000.0	4.40	4 617	0.10
空洞	Air	1 005.0	0.026		0.10
塑料外壳	PPS塑料	2 500.0	0.300		
密封硅脂	密封硅脂	1 000.0	0.200		

表3　试验组芯片不同空洞率下的空洞半径

Table 3　Void radiuses of the experimental chip group at different void ratios　mm

芯片（二极管）	空洞率/%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
D4a	0	0.642	0.908	1.112	1.285	1.436	1.573	1.699	1.817	1.927	2.031
D6a	0	0.303	0.429	0.525	0.607	0.678	0.743	0.802	0.858	0.910	0.959

表4　芯片分组及其功耗配置

Table 4　Chip grouping and power consumption configuration　W

分组	热阻调参仿真		空洞率仿真
	单芯片功率损耗	组总损耗	单芯片功率损耗
T1*x*/T2*x* /T3*x*/T4*x*(*x* = a,b)	50	100	
T5/T6	100	100	
D1*x*/D2*x*/D3*x*/D4*x*(*x* = a,b)	50	100	50
D5*x*/D6*x*(*x* = a,b,c,d,e)	20	100	50

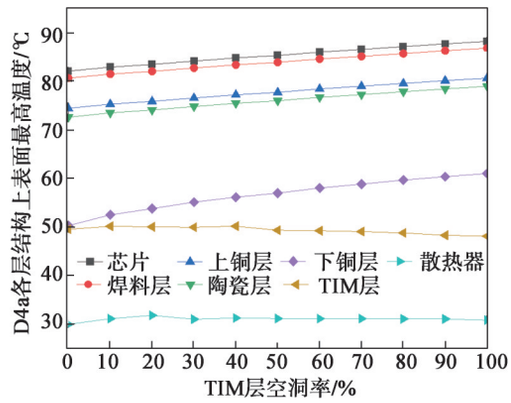
3　结果分析

IGBT模块热量从体热元（即试验芯片发热区域）开始纵向传导，横向扩散，各层结构最高温度值逐层降低，温度扩散范围逐层扩大。图4为无基板模块上D4a和D6a的各层结构在不同空洞率下的温度变化趋势，图5为有基板模块上D4a和D6a的各层结构在不同空洞率下的温度变化趋势。TIM层空洞的出现导致TIM层热阻增大，这在无基板模块上表现较为明显。因此，以空洞率20%为起点，用最小二乘法拟合其结温、下铜层、基板、散热器上表面最高温度，以及基板和散热器温差变化趋势，提取公式为

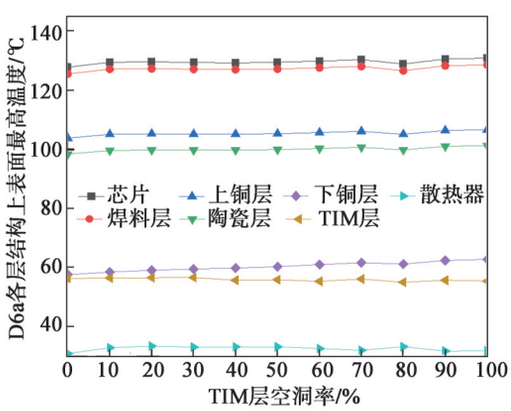
$$T_{\max_\rho_{\text{hole}}} = k\rho_{\text{hole}} + T_{\rho_{\text{hole}}_0} \tag{3}$$

式中：$T_{\max_\rho_{\text{hole}}}$为当空洞率为$\rho_{\text{hole}}$时，芯片当前层结构的最高温度；$k$为最高温度随空洞率变化的斜率；$T_{\rho_{\text{hole}}_0}$为在拟合公式中，当空洞率为0时的当前层结构最高温度。

其中，提取公式中的起始值和在TIM层空洞率区间(0.2,1.0)的斜率k如表5所示。



(a) D4a



(b) D6a

图4　无基板模块不同空洞率下D4a和D6a各层上表面最高温度

Fig. 4　The highest temperature of upper surface of each layer of D4a and D6a at different void ratios on module without baseplate

由表5可知：

①在无基板模块中，随着空洞率的变化，D4a的升温速率k值约为D6a的3.074倍，而在有基板模块中，D4a的升温速率k值为D6a的23.000倍。这表明芯片面积小的结温随着TIM层空洞率增加而升高的速率相对

表5　2种模块不同材料芯片热相关参数随空洞率变化表

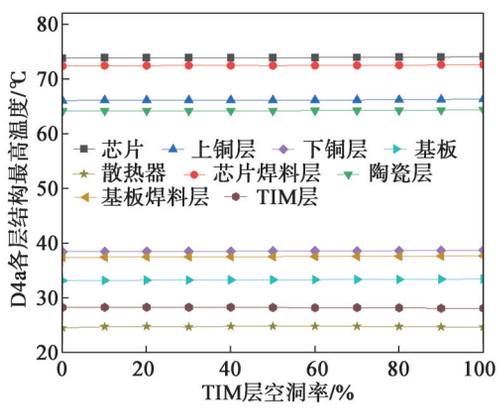
Table 5　Variation of thermal parameters of chips with different materials on the two kinds of module as a function of void ratio

参数名称		无基板模块		有基板模块	
		D4a（30.25 mm²）	D6a（9.61 mm²）	D4a（30.25 mm²）	D6a（9.61 mm²）
$T_{\rho_{\text{hole}}_0}$		0	0	0	0
k		5.923	1.927	0.184	0.008
结温/℃		82.441	128.990	73.863	119.446
模块间温差/K	D4a	8.578			
	D6a	9.544			
不同位置升温速率k值之比	模块内（D4a, D6a）	3.074		23.000	
	模块间（D4a）	32.190			
	模块间（D6a）	240.875			

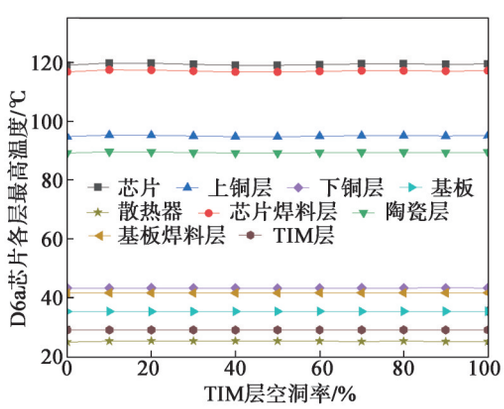
较慢，这在有基板模块上表现更明显。

②对于芯片二极管D4a，有基板模块的结温比无基板模块低8.578 K左右；对于芯片二极管D6a，有基板模块的结温比无基板模块低9.544 K左右。这表明有基板模块芯片结温低于无基板模块，模块的散热效果更好。

③对于芯片二极管D4a，无基板模块的升温速率k值为有基板模块的32.190倍，大1.5个数量级；对于芯片二极管D6a，无基板模块的升温速率k值为有基板模块的240.875倍，大2.4个数量级。因此，当TIM层空洞率升高时，有基板模块上的芯片结温增加相对更少。



(a) D4a



(b) D6a

图 5　有基板模块不同空洞率下 D4a 和 D6a 各层上表面最高温度

Fig. 5　The highest temperature of upper surface of each layer of D4a and D6a at different void ratios on module with baseplate

4　结论

本文对IGBT模块是否配置基板对其中芯片结温的影响，以及芯片结温随芯片正下方TIM层空洞率增加的升温速率进行了研究，得出以下结论：

①在芯片结构、散热装置与外部散热条件相同的情况下，有基板模块芯片结温低于无基板模块。

②对于同一器件，当TIM层空洞率上升时，大面积芯片的结温斜率k值比小面积芯片更大。对于无基板器件，大面积芯片随TIM层空洞率上升的升温速率是小面积芯片的3.074倍；对于有基板器件，大面积芯片随TIM层空洞率上升的升温速率约是小面积芯片的23.000倍。

③有基板模块的芯片结温随TIM层空洞率变化速率比无基板模块更小。对于D4a的k值，无基板约为有基板的32.000倍，大1.5个数量级；对于D6a的k值，无基板约为有基板的240.875倍，大2.4个数量级。

综上所述，无基板IGBT模块比有基板IGBT模块在应用时对导热硅脂状态的要求更高，导热硅脂对无基板IGBT模块的结温影响更大。

参考文献：

[1] 福尔克, 郝康普. IGBT模块: 技术、驱动和应用[M]. 韩金刚, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016: 28-40.
VOLKE A, HORNKAMP M. IGBT modules: technologies, driver and application[M]. translated by HAN Jingang. Beijing: China Machine Press, 2016: 28-40.

[2] 龚金水, 陆虎瑜, 江云, 等. 光伏发电系统正弦波高效率逆变器电路分析[J]. 电工电能新技术, 1991(2): 6-12.
GONG Jinshui, LU Huyu, JIANG Yun, et al. The circuit analysis of sinewave high efficiency inverter for photovoltaic systems[J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 1991(2): 6-12.

[3] 王磊, 周明超, 郭梦雪, 等. 基于任务剖面的牵引变流器IGBT模块焊料层疲劳应力与剩余使用寿命的映射方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊1): 269-278.
WANG Lei, ZHOU Mingchao, GUO Mengxue, et al. A mapping method of solder layer fatigue stress and remaining useful life for IGBT module in a traction converter based on the mission-profile[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Suppl 1): 269-278.

[4] 李晓平, 刘江, 赵帑, 等. 逆导型IGBT的发展及其在智能电网中的应用[J]. 智能电网, 2017, 5(1): 1-8.
LI Xiaoping, LIU Jiang, ZHAO Ge, et al. Development and application of reverse conducting-IGBT in smart grid[J]. Smart grid, 2017, 5(1): 1-8.

[5] 周星宏. 航空中频地面电源控制策略的研究[D]. 成都: 西华大学, 2021.
ZHOU Xinghong. Research on control strategy of aviation medium frequency ground power supply[D]. Chengdu: Xihua University, 2021.

[6] 俞朝春. 某型雷达发射机故障预测与健康管理关键技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
YU Chaochun. Research on key technologies of prognostics and health management for a radar transmitter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.

[7] HUANG Hui, MAWBY P A. A lifetime estimation tech-

nique for voltage source inverters[J]. IEEE transactions on power electronics, 2013, 28(8): 4113-4119.

[8] ZHANG Xiaotong, CHENG Zhuolin, LYU Chunlin, et al. A thermal network model considering thermal coupling effect and TIM degradation in IGBT modules[J]. Energy reports, 2023, 9(Suppl 10): 1073-1080.

[9] 刘宾礼, 罗毅飞, 肖飞, 等. 基于传热动力学作用特征的IGBT结温预测数学模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 79-87.
LIU Binli, LUO Yifei, XIAO Fei, et al. Junction temperature prediction mathematical model of IGBT based on the characteristics of thermal dynamics[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2017, 32(12): 79-87.

[10] NELSON J J, VENKATARAMANAN G, EL-REFAIE A M. Fast thermal profiling of power semiconductor devices using Fourier techniques[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2006, 53(2): 521-529.

[11] 刘黎, 李康, 黄萌, 等. 基于电压电流特性曲线的MMC子模块IGBT通态损耗在线计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 19-27.
LIU Li, LI Kang, HUANG Meng, et al. On-line calculation method of an IGBT on-state loss of an MMC sub-module based on a voltage and current characteristic curve[J]. Power system protection and control, 2022, 50(23): 19-27.

[12] CAO Han, NING Puqi, WEN Xuhui, et al. Practical SPICE model for IGBT and PiN diode based on finite differential method[J]. Journal of power electronics, 2019, 19(6): 1591-1600.

[13] 姚芳, 王少杰, 陈盛华, 等. IGBT功率模块瞬态热阻抗测量方法研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 103-105.
YAO Fang, WANG Shaojie, CHEN Shenghua, et al. Research on transient thermal impedance measurement method of IGBT power module[J]. Power electronics, 2016, 50(9): 103-105.

[14] 贾英杰, 肖飞, 罗毅飞, 等. 基于场路耦合的大功率IGBT多速率电热联合仿真方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1952-1961.
JIA Yingjie, XIAO Fei, LUO Yifei, et al. Multi-rate electro-thermal simulation method for high power IGBT based on field-circuit coupling[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(9): 1952-1961.

[15] 张艺驰. 基于傅里叶变换的IGBT结温快速计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHANG Yichi. Fast calculation method research for IGBT junction temperature based on Fourier transform[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 41-43.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 41-43.

[17] Infineon Technologies AG. F3L400R10W3S7_B11[Z]. München: Infineon Technologies AG, 2020.

收稿日期：2023-06-30
修回日期：2023-08-29